



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ELEKTRICKY POHÁNĚNÉ LETOUNY

AIRPLANES POWERED BY ELECTRIC ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Behúl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karol Bencalík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Michal Behúl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karol Bencalík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Elektricky poháněné letouny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti je snaha rozvíjet alternativní pohony letounů. Využití elektrické energie pro pohon letounů a jejich systémů je velice aktuální. Výběr koncepce pohonné soustavy je důležitým krokem pro návrh letounu. Pro samotnou pohonnou soustavu jsou důležité jednotlivé komponenty, které se každým rokem zdokonalují a zlepšují tak možnosti a charakteristiky pohonu letounu.

Cíle bakalářské práce:

- Proved'te rešerši elektrických letounů
- Popište principy pohonných systémů
- Vytvořte návrh jednoduché pohonné soustavy pro motor o výkonu 50kW.

Seznam doporučené literatury:

FLORIÁN, M. Možnosti alternativních pohonů letadel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.

BENCALÍK, K. Návrh úprav letounu VUT 001 MARABU s pohonem vodíkovými palivovými články a bateriemi [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2009.

KOŠTIAL, R. Návrh zástavby vodíkové tlakové nádrže na křídlo letounu VUT 001 Marabu [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2010.

KAPOUN, T. Návrh letounu pro zástavbu hybridní pohonné jednotky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalárska práca sa zaoberá elektrickým pohonom letúnu a rešerši letúnu s týmto pohonom. Práca je rozdelená na hlavné tri časti. Prvá časť je venovaná elektrickému pohonu a zvlášť problematike batérii. Druhá časť je rešerš, ktorá obsahuje vybrané letúny s elektrickým pohonom zo súčasnosti alebo nádejné projekty do budúcnosti. Tretia časť je jednoduchý konštrukčný návrh elektrickej pohonnej sústavy s motorom o výkone do 50kW, ktorý sa prevažne venuje výberu správneho akumulátora.

Kľúčové slová

Elektrický letún, elektrický pohonný systém, batérie, akumulátor

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is electric propulsion used in airplanes and overview of airplanes with this kind of propulsion. Thesis is divided into three main parts. First part describes electric propulsion systems, mainly descriptions of batteries. Second part describes chosen airplanes with electric propulsion in use and promising prototypes still in development. Third part is construction design of electrical propulsion system with 50 kW motor, mainly focusing on computing needs for batteries.

Keywords

Electric airplane, electric propulsion system, batteries, accumulator

Bibliografická citácia

BEHÚL, Michal. Elektricky poháněné letouny. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135728>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Karol Bencalík.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Elektricky poháněné letouny vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Karol Bencalík, Ph.D., s použitím literatury a dalších podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně

Michal Behúl

Pod'akovanie

Týmto by som chcel pod'akovať svojmu vedúcemu práce Ing. Karolovi Bencalíkovi, Ph.D. za vedenie práce a trpezlivosť. Ďalej by som chcel pod'akovať všetkým, ktorý pri mne stáli a pomohli, či už radou alebo podporou, pri písaní tejto záverečnej práce.

Obsah

Úvod	13
1. Elektrický pohonný systém.....	14
1.1. Batérie	14
1.1.1. Li-ion.....	15
1.1.2. Náhrady za Li-ion.....	18
1.1.3. Alternatívne zdroje energie.....	21
1.2. Batériový monitorovací systém – BMS	21
1.3. Elektromotor	23
1.4. Invertor.....	26
2. Prehľad vybraných elektrických lietadiel	28
2.1. Pipistrel Velis electro.....	28
2.2. Alice	29
2.3. Lillium Jet.....	31
2.4. X-57 Maxwell.....	32
2.5. Elektrické letúny v českej republike	35
2.5.1. Pure flight ΦNIX	35
2.5.2. Zuri	36
2.5.3. VUT 051 Ray	37
3. Návrh jednoduchéj pohonnej sústavy pre motor s výkonom 50kW.....	39
3.1. Určenie charakteristík letu	39
3.2. Výber akumulátora.....	41
3.3. Výber invertoru	42
Záver.....	43
Zoznam použitých zdrojov	44
Zoznam tabuliek	53
Zoznam obrázkov	53
Zoznam použitých skratiek a symbolov	54

Úvod

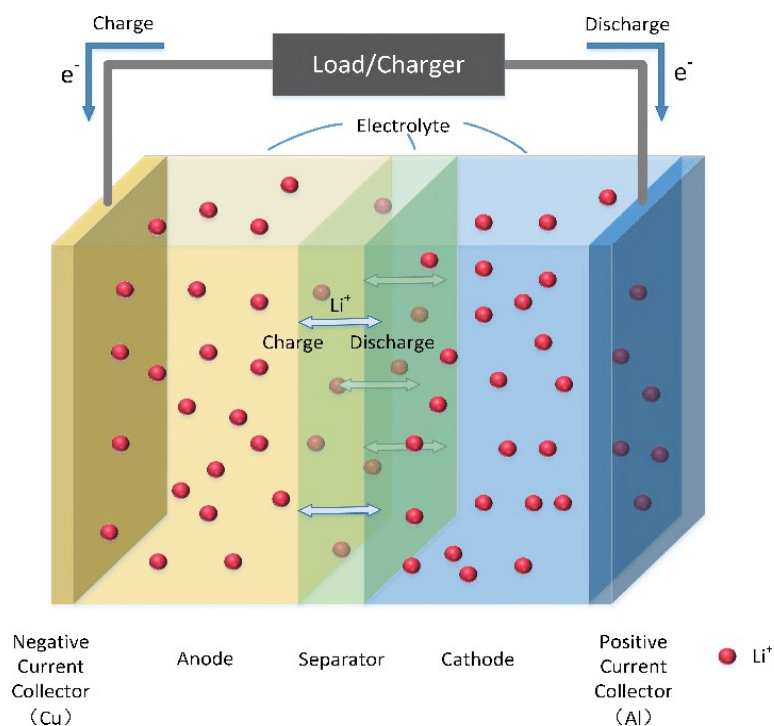
Myšlienka použitia elektrickej energie ako hlavný zdroj pohonu letúnov siaha až ku koncu 19. storočia. Vtedy myšlienky využitia tohto typu motoru skôr smerovali k použitiu vo vzducholodiach. Začiatkom 20. storočia začali experimenty s použitím elektrického pohonu v helikoptéroch a následne aj na malých lietadlových modeloch. V 70. rokoch sa objavili prvé prototypy letúnu na nikel-kadmiové batérie, ktoré boli v tej dobe úplnou novinkou. Aj preto, že myšlienka je tu už dlhšiu dobu, stále bola veľmi obmedzená dostupnými poznatkami v oblasti vedy a techniky. Preto až v relatívne nedávnej dobe hlavne vďaka vývoji v oblasti batérii došlo k prvým použitím na športových letúnoch a bezpilotných lietadlách. Významným historickým míľnikom je bezpochyby let letúnu Solar Impulse II, ktorý v roku 2016 ako prvý dokončil cestu okolo sveta iba s pohonom na slnečnú energiu. Ďalším historickým míľnikom bol prvý let plne elektrického komerčného letúnu od spoločnosti MagniX a Harbour Air v roku 2019. Stále viac spoločností sa zaoberá touto témou, kvôli rýchlo rastúcemu vývoju batérií, ale tiež kvôli rastúcim nárokom z hľadiska ochrany životného prostredia a mnoho ďalších dôvodov popísaných v tejto práci. [62] [63]

1. Elektrický pohonný systém

1.1. Batérie

Batérie sú úložiskom energie. V tomto je hlavný problém elektricky poháňaných letúnov. Špecifická energia bežne používaného leteckého benzínu je okolo 12 000 Wh/kg, ale priemerná špecifická energia súčasných batérií je 150 Wh/kg. [57] [58]

Batérie majú dve oddelené cesty (Obr. 1.1). Po jednej prechádzajú elektróny z anódy na elektrickú záťaž v obvode a vstrebávajú sa do katódy. Druhá cesta je pohyb iónov pri nabíjaní, ktoré prechádzajú medzi elektródami separátorom. Separátor slúži ako bariéra pre elektróny a prepúšťa len ióny. Pri nabíjaní sa ióny nahromadia na rozhraní medzi elektrolytom a katódou, čo vytvorí negatívny náboj na anóde a zvyšuje sa elektrický potenciál. Pri vybití sa „otvorí“ cesta pre elektróny, ktoré prechádzajú zo zápornej elektródy na kladnú, aby potenciál klesol na nulu. [56] [61]



Obr. 1.1: Schéma batérie [61]

Batérie sa rozdeľujú na primárne a sekundárne články. Primárne články sa nedajú ľahko opakovateľne nabiť, preto sú iba na jedno použitie a následne sa likvidujú. Výhodou primárnych článkov je medzi inými aj vysoká hustota energie a nízka cena výroby. Sekundárne články sú batérie, ktoré sa dajú opakovateľne nabíjať vyšší počet krát. Takéto batérie sa nazývajú akumulátory. Sekundárne články majú zložitejšiu výrobu a vyššie riziká spojené s opakovaným nabíjaním ako napríklad prehrievanie, dendritický rast, ktorý zvyšuje šance na skrat. Viaceré akumulátory využívajú ako elektrolyt nebezpečné látky (horľavé, toxické atď.) [56]

1.1.1. Li-ion

Lítium-iónové články sú vysoko modulárne, vďaka jednoduchosti môžu byť v rôznych tvaroch. Najčastejšie ako valcovité články, ktoré sa spájajú do akumulátorových modulov a tie sa dajú zapájať spolu sériovo alebo paralelne podľa potreby použitia do takzvaných „battery pack“, z ktorých sa skladá celková akumulátorová sústava, v ktorej je zahrnutý aj správcovský, chladiaci systém a kryt akumulátora. [2] [4] [5]

Elektrolyty v Li-ion článkoch najčastejšie bývajú roztoky rozpustenej lítiovej soli, ktoré umožňujú voľný pohyb Li^+ iónov. Na anódy sa používajú interkalačné materiály. Voľné ióny sa viažu na voľné miesta v priestore kryštalickej mriežky interkalačného materiálu. Voľné miesta v mriežke sú výrazne obmedzené, preto majú nižšiu kapacitu ako konverzné materiály. Výhodou je nemenlivosť objemu pri nabíjaní a vybíjaní. [2] [4] [5]

V dnešnej dobe sa používa na anóde najmä grafit. Ako náhrada sa uvažuje grafen, ktorý je niekoľko násobne ľahší, ale zatiaľ je cenovo nedostupný na širšie využitie. Katóda je zdrojom lítia a najčastejšie sa používajú oxidy kovov, ktoré majú špecifické zloženie podľa potreby použitia. Na letecké potreby sa uvažujú najmä materiály, ktoré poskytujú, čo najvyššiu kapacitu. [2] [4] [5]

LCO – Kobaltitan lithný (LiCoO_2)

Tento materiál má vysokú mernú energiu a aj preto bol ako prvý úspešne komerčne dostupný materiál. Merná energia sa pohybuje okolo 150 – 200 Wh/kg. Nominálne napätie je 3,6 V. Priemerná životnosť je medzi 500-1000 cyklami. Táto hodnota je ale

znázorňuje najdôležitejšie vlastnosti. [1] [2]



Obr. 1.2: Znázornenie najdôležitejších vlastností LCO [3]

jednu hodinu.

LMO – Lítium mangán oxid (LiMn_2O_4)

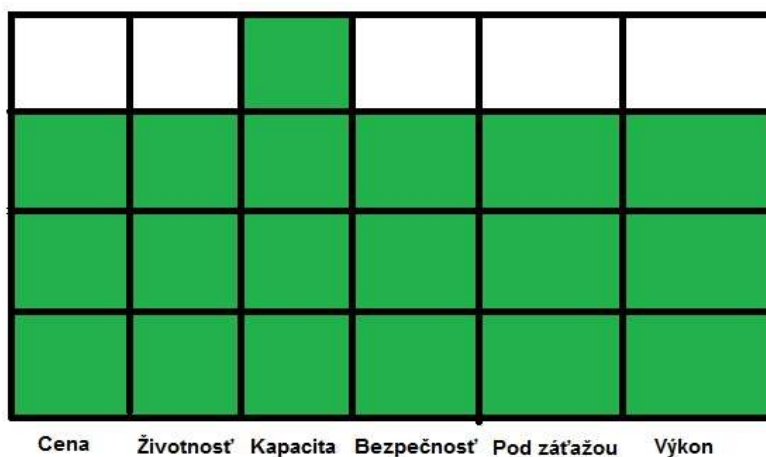
vlastností sa kombinuje s NMC. Obr. 1.3 znázorňuje najdôležitejšie vlastnosti. [1] [2]



Obr. 1.3: Znážornenie najdôležitejších vlastností LMO [3]

MNC - Lítium nikel-mangán kobalt oxid (LiNiMnCoO_2)

Nikel je významný vysokou mernou energiou a mangán nízkym vnútročlánkovým odporom. Zloženie závisí od požadovaného využitia, kobalt je využitý najmä na stabilizovanie niklu. Pomer medzi prvkami je uvedený v názve ako napríklad najpoužívanejší je NMC, ktorý je v pomere 1:1:1. Kvôli zníženiu ceny je významný aj NMC532, ktorý je v pomere 5:3:2. Životnosť sa pohybuje medzi 1000-2000 cyklami. Výhodou NMC článkov je porovnateľná kapacita s LCO bez významného tepelného zahrievania. Nabíjanie sa nedoporučuje nad 1C, aby sa neznížila kapacita. Vybíjanie je možné do 2C. Niektoré NMC články môžu byť optimalizované na zvýšenie možného vybíjacieho prúdu, ale za následok je zníženie kapacity. NMC nahrádza LCO vo všeobecnom použití ako aj v elektrických mobilných prostriedkoch. Obr. 1.4 znázorňuje najdôležitejšie vlastnosti. [1] [2]



Obr. 1.4: Znážornenie najdôležitejších vlastností MNC [3]

NCA - Lítium Nikel kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO₂)

Vďaka vysokej kapacite niklu, ktorý je hlavný z aktívnych prvkov sú NCA akumulátory s najvyššou mernou energiou, ktorá dosahuje základné hodnoty cez 200 Wh/kg. Na stabilizáciu veľmi nestabilného niklu sa kombinuje s kobaltom a pridávaním hliníku sa zlúčenina ešte viac stabilizuje, čo má za následok aj vysokú životnosť, a to až 3000 cyklov. Veľkou nevýhodou je bezpečnosť a hlavne kumulované teplo nemôže dosahovať vyšších hodnôt ako 150 °C. Hlavným zástancom tejto technológie je v súčasnosti automobilová spoločnosť Tesla, ktorá za posledné roky uvádza významné pokroky hlavne v oblasti zvýšenia kapacity, zníženia ceny a redukcie používaného kobaltu. Obr. 1.5 znázorňuje najdôležitejšie vlastnosti. [1] [2]



Obr. 1.5: Znázornenie najdôležitejších vlastností NCA [3]

1.1.2. Náhrady za Li-ion

Ďalšie Li-ion batérie, ktoré využívajú grafit ako anódu (LFP, LTO...), sa pre letecké využitie nehodia, hlavne z dôvodu nízkej mernej špecifickej energie.

V súčasnej dobe sa ukazujú výrazné pokroky v alternatívnych druhov batérií.

Najperspektívnejšie sú alternatívy, ktoré využívajú konverzné materiály, ako kremík namiesto grafitu na anóde, síra a fluoridy na katóde, alebo články s tuhým elektrolytom.

Kremíkové anódy

Kremík využíva konverzný mechanizmus ukladania iónov lítia. Tento mechanizmus umožňuje viazanie lítia na kremík, čím vzniká nová zlúčenina. Na rozdiel od interlokačných mechanizmov môžu mať až 10 násobne vyššiu kapacitu. Atómový pomer súčasne používaného grafitu k lítiu je 6:1, pomer kremíku k lítiu je 1:3,75. Pri zmene štruktúry, ktorá nastáva pri vybíjaní a nabíjaní, kremík mení svoj objem až o 300%. Pri zmene objemu sa objavujú výrazné napätia, ktoré môžu porušiť balenie článku. Škoda sa tiež prejavuje pri poškodení vrstvy vytvorenej na rozhraní anódy a elektrolytu, čím výrazne klesá kapacita. V súčasnosti sa pridáva do grafitu v anóde do 10% kremíku vo forme tzv. nano silicon. Vďaka kremíku môžu v súčasnosti výrobcovia li-ion článkov dosahovať kapacity cez 300 Wh/kg. [4] [7] [9] [10]

Lítiová anóda a tuhý elektrolyt

Kovové lítium na anóde je využívané prevažne v primárnych batériách. Lítium je najľahší kov, vďaka čomu má vysokú teoretickú mernú energiu. Pri využití na sekundárne batérie má vysoký potenciál. Lítiová anóda funguje na princípe konverzného mechanizmu. Hlavná nevýhoda lítiovej anódy je dendritický rast, ktorý znižuje životnosť článku a môže dôjsť aj ku skratu. Dendritickému rastu sa dá zabrániť vytvorením separačnej vrstvy, ktorá vzniká reakciou na povrchu anódy s elektrolytom. Na zlepšenie životnosti sa vyvíjajú rôzne metódy zlepšenia odolnosti voči dendritom, ako napríklad úpravou aditív, umelou ochrannou vrstvou alebo využitím tuhého elektrolytu. V súčasnosti sa preukazujú veľké pokroky práve v oblasti tuhých elektrolytov, ktoré majú nie len zabrániť rastu dendritov, ale aj zvýšiť mechanickú odolnosť voči vonkajšiemu poškodeniu. Na rozdiel od tekutých alebo gélových elektrolytov sú tuhé elektrolyty nehorľavé. Používajú napríklad suchý polymér alebo keramické separátory. Nevýhody sú hlavne nízka vodivosť, problémy pri nízkych teplotách a nízka životnosť (100 cyklov). [7] [8] [9] [10]

Lítium síra - Li-S

Anóda pri Li-S je z lítia, ktorý je najľahší kov a má vysokú teoretickú kapacitu. Katóda sa skladá zo síry, ktorá má nízku mernú hmotnosť a vysokú teoretickú kapacitu a je ľahko prístupná a hojne vyskytujúca v prírode, čo zaručuje nízku cenu.

Teoretická merná kapacita Li-S je až 2700 Wh/kg, v súčasnosti sú dosiahnuté hodnoty okolo 500 Wh/kg. Najčastejším problémom je nízka životnosť. Pri kontakte rozpustených polysulfidov v elektrolyte s lítiovou anódou dochádza ku porušovaniu separačnej vrstvy na povrchu elektródy, čím sa zvyšuje spotreba materiálu na obnovu vrstvy a s týmto klesá výrazne kapacita. Môže pri porušení vrstvy dôjsť aj k dendritickému rastu a následnému skratu. V súčasnej dobe sa vyvíjajú separátory, ktoré by boli schopné zabrániť kontaktu, čo by mohlo zvýšiť životnosť až cez 1500 cyklov. [4] [6] [7] [10]

Lítium-polymér - Li-pol

Technológia lítium- polymérových článkov je rovnaká ako pri Li-ion. Používajú sa aj rovnaké materiály na elektródach. Hlavný rozdiel je v elektrolyte. V Li-pol sa používa gélový elektrolyt. Má vyššiu odolnosť voči vonkajšiemu poškodeniu. Dosahuje vyššej energetickej hustoty a môže sa vyrobiť v forme tenkých plátov, ktoré sú ľahšie použiteľné v malých elektrických zariadeniach. Napriek lepšej energetickej hustote, merná špecifická energia je lepšia pri Li-ion. V letectve sa najmä používajú v malých modeloch a bezpilotných letúnoch. [11] [12]

Primárne batérie

Na veľké vzdialenosti a väčší náklad je za potreby vysoká merná špecifická energia v hodnotách nad 500 Wh/kg. Tieto hodnoty sú zatiaľ dosiahnuteľné iba za použitia vybraných primárnych batérií, najmä kov-vzduch. Tieto batérie využívajú katalytickú vzduchovú katódu dodávajúcu kyslík. Elektrická energia sa generuje oxidáciou kovovej anódy. Hliník-vzduch predstavuje aktuálne výhodnú alternatívu, kvôli nízkej cene výroby a rozšíreniu hliníku. Hliník má teoretickú mernú špecifickú energiu 8100 Wh/kg. Výhoda primárnych batérií je aj možnosť rýchlej zámény batérií po pristání, časovo porovnateľné s dopĺňovaním paliva pri spaľovacích motoroch. Vo vývoji sú aj lítium-vzduch. Lítium má teoretickú mernú špecifickú energiu 13 kWh/kg. Pri lítii sa objavujú problémy s reaktivitou lítia a následnými bezpečnostnými rizikami. Výskum lítium-vzduch článkov má aj budúcnosť vo využití tejto technológie na sekundárne články. [7] [13] [14] [15]

1.1.3. Alternatívne zdroje energie

Na zlepšenie letových charakteristík, najmä z zvýšenie doletu, sa niekedy používajú aj alternatívne zdroje energie. Ako dodatočný zdroj energie sa najčastejšie využíva vodík alebo slnečná energia. Generovaná energia sa ukladá do akumulátorov.

Vodík

Hlavnou výhodou využitia vodíkových palivových článkov je vysoká špecifická energia vodíku ktorá dosahuje hodnoty vyše 30kWh/kg. Nevýhody sú hlavne v uskladnení, čo je spojené s energetickou hustotou, ktorá je nižšia ako u batérií. Problémy s uskladnením sú aj pri otázke bezpečnosti, keďže vodík je vysoko reaktívny a hrozí výbuch. Vodíkový palivový článok funguje na princípe reakcie vodíka s kyslíkom, kde produktom je voda. Pri reakcii sa výrazne uvoľňuje teplo, čím je za potreby zahrnúť do konštrukcie aj chladenie palivových článkov, čím sa zvyšuje následná hmotnosť systému. Využitie vodíkových palivových článkov je najmä pri stredných a väčších lietadiel. [64]

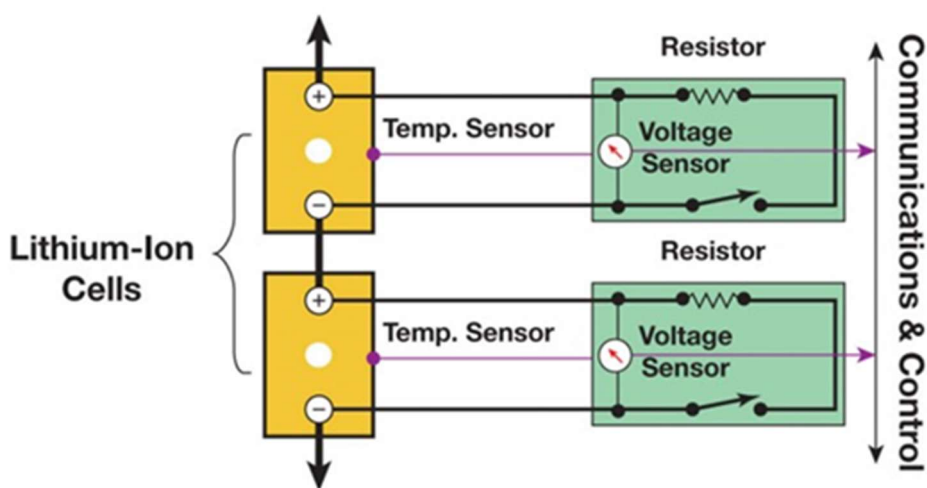
Solárna energia

Solárna energia sa premieňa na elektrickú energiu vo fotovoltaiických článkoch. Solárne panely produkujú malé množstvo energie pri rozložení na veľkej ploche. Výhoda solárnej energie je možnosť neobmedzeného doletu pri nízkej spotrebe energie a pri veľkej ploche panelov. Pri letúnoch sa najčastejšie panely umiestňujú na plochu krídel. Solárna energia predstavuje možnosť vyvinúť lietadlo schopné letu bez prestávky až po opotrebovanie materiálov. Letún Solar impulse 2 uskutočnil oblet zemegule bez pristania v roku 2016 vďaka technológii fotovoltaiických článkoch. [65]

1.2. Batériový monitorovací systém – BMS

Na predĺženie životnosti a odstránenie niektorých problémov s nabíjaním a vybíjaním akumulátorových článkov (najčastejšie Li-ion a Li-pol) sa používajú ochranné elektronické obvody. Tieto obvody sa nazývajú BMS, podľa anglického „battery management system“ (systém na správu batérií), nazývané aj balancér. [16]

Na balancér sú najčastejšie pripojené snímače napätia jednotlivých článkov, snímače prúdu a teplomer (Obr. 1.6). Balancér vyhodnocuje dáta zo snímačov a podľa toho určuje aktuálne zdravie článkov (SOH – state of health) , stav nabitia (SOC – state of charge) a chybovosť článkov. Pri nabíjaní a vybíjaní sa snaží vyrovnať spotrebu energie na každé články rovnako. Toto je za potreby lebo sa žiadne články nedajú vyrobiť zhodné. Pri nabíjaní môže dosiahnuť niektorý článok plné nabitie skôr ako zvyšné, v tomto prípade zakročí BMS. Najčastejšie zakročí dvoma spôsobmi: začne článok vybíjať cez vnútorný rezistor na potrebnú hodnotu, alebo vyradí článok dočasne z obvodu. [16] [43] [44]



Obr 1.6: Schéma BMS [45]

BMS stráži teplotu a napätie na článkoch. Pri nabíjaní môže dôjsť k takzvanému prebíjaniu, pri prebíjaní sa batérie môže stať nestabilná a začne sa prehrievať. Prehrievanie môže dosiahnuť až zápalnej teploty materiálu dochádza k horeniu a môže dôjsť aj k výbuchu. Pri vybíjaní by sa nemali články vybíjať pod hranicu určenú výrobcom. Pri používaní aj pri nízkom napätí (pri li-ion je to okolo 2,5 V) sa zvyšuje riziko skratu vnútri článku. Používanie batérie pri nízkych teplotách (menej ako -20°C) obmedzuje pohyb iónov medzi elektródami a môže dôjsť ku poškodeniu článku. Ak BMS zaznamená priblíženie k medzným hodnotám, odpojí potrebné články alebo celý battery pack a vyhlási chybovú hlášku používateľovi. [16] [43] [44]

Ďalšou funkciou BMS je výpočet alebo odhad aktuálneho stavu nabitia a zdravia akumulátora. SOC je podiel aktuálnej kapacity a maximálnej kapacity, udáva sa v percentách. Aktuálna kapacita sa vypočíta integráciou funkcie prúdu závislou na čase.

SOH je podiel súčasnej maximálnej kapacity a maximálnej kapacity nového článku. Hodnota maximálnej kapacity klesá pri v závislosti na počte nabíjacích cyklov. Časom sa zvyšuje aj vnútorný odpor článkov, čím sa tiež znižuje kapacita. [16] [43] [44]

BMS môže byť použitý aj ako ovládací prvok chladenia batérie, aby sa teplota batérie pohybovala v optimálnych hodnotách.

1.3. Elektromotor

Elektrický motor premieňa elektrickú energiu na mechanickú. Mechanická energia vzniká pôsobením premenlivého magnetického poľa na stále magnetické pole. Premenné magnetické pole vzniká striedaním polarít na cievkach. Stále magnetické pole pôsobí z permanentného magnetu alebo cievky bez zmeny polarít. Motor sa skladá z dvoch základných častí, rotor a stator.

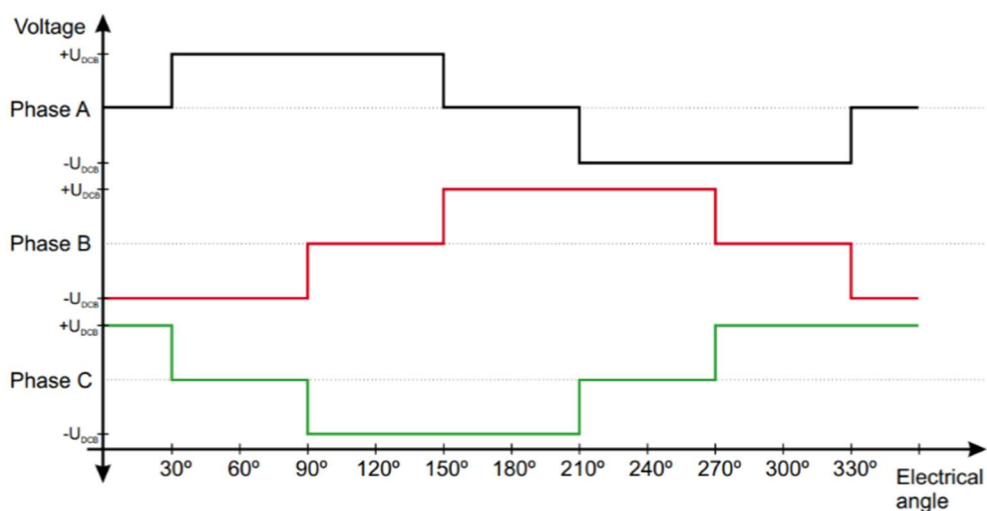
Elektrické motory oproti spaľovacím majú výhody najmä v efektívnosti, ktorá pri elektromotoroch dosahuje až 90 % na rozdiel od spaľovacích, ktoré dosahujú maximálne 35 %. Ďalšou výhodou je malé množstvo pohyblivých komponentov v motore, vďaka čomu má nízku poruchovosť. Elektrické motory dosahujú niekoľko násobne nižšie teploty ako spaľovacie motory. Maximálne teploty môžu dosahovať 150 °C, vďaka čomu je jednoduchšie chladenie a úspora hmotnosti. Merný výkon elektrických motorov sa pohybuje medzi 3-15 kW/kg, u spaľovacích je to okolo 2kW/kg. V letectve je dôležité vyberať čo najľahšie komponenty. Motory s najvyšším merným výkonom sú jednosmerný bezkefový motor (BLDC) a synchronný motor s permanentným magnetom (PMSM alebo SMPM) vid' tabuľka 1.1. Synchronné motory majú, výhodu že sa dajú riadiť otáčky motora zmenou frekvencie napájacieho napätia. [46] [47] [48]

Tab. 1.1 Porovnanie parametrov určitých druhov elektromotorov [46]

	PMSM	PMSM s toleranciou chýb	BLDC	SRM	IM	BDFRM
Krútiaci moment (Nm)	1250	1430	950	1530	480	1300
Počet pólov	20	12	12	48/16	2	6(rotor), 8(primárny, 4sekundárny)
Uhlová rýchlosť hriadeľa (RPM)	11500	10000	15000	9375	29700	11000
Efektivita	99,2	98,9	98,8	97,9	97,6	97,6
Hmotnosť (kg)	113,6	173,8	120,5	528,4	283,5	2110
Merný výkon (kW/kg)	13,2	8,63	12,45	2,84	5,29	0,71

BLDC motor

BLDC motor je tiež známy ako elektricky komutovaný motor (EC motor). Rotor je tvorený permanentnými magnetmi, najčastejšie zo vzácnych zemín. Stator je tvorený trojfázovým vinutím v zárezoch. Rotácia pri BLDC motore je zaručená prepínaním tranzistorov napájania, synchronizovaných s polohou magnetov na rotore. Poloha rotoru je snímaná hallovými senzormi. Indukované napätie na fáze má obdĺžnikový alebo lichobežníkový tvar (Obr. 1.7). [46] [47] [49] [50]



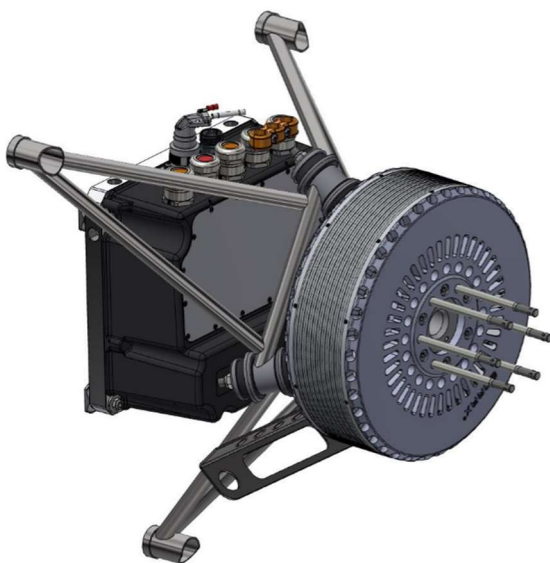
Obr. 1.7: Priebeh indukovaného napätia na fázach v závislosti na polohe rotoru [49]

BLDC motor pracuje hlavne pri vyšších otáčkach a s nízkym momentom. Pri malých otáčkach sa objavuje problém so sledovaním pozície rotora. Preto na pripojenie vrtule je za potreby použitia prevodovky s prevodom do nižších otáčok, čím sa navýši celková hmotnosť sústavy. Môžu byť použité čelné alebo planetárne prevodovky. [46] [47] [49] [50]

PMSM

Synchrónny motor s permanentnými magnetmi (Obr. 1.8) je konštrukčne veľmi podobný bezkefovému motoru. Motor je napájaný zo zdroju striedavého napätia . Rotačný pohyb umožňujú cievky na statore, ktoré sú napájané striedavým prúdom s najčastejšie tromi fázami. Indukované napätie má sínusový priebeh. Zmena uhlovej rýchlosti motora je závislá od frekvencie striedavého prúdu. Na zmenu točivého momentu a výkonu sa používajú frekvenčné meniče a PWM na úpravu amplitúdy. Rozbeh je možný len s vinutím na krátko, čím sa štart motora považuje za asynchrónny. [46] [47] [51] [52]

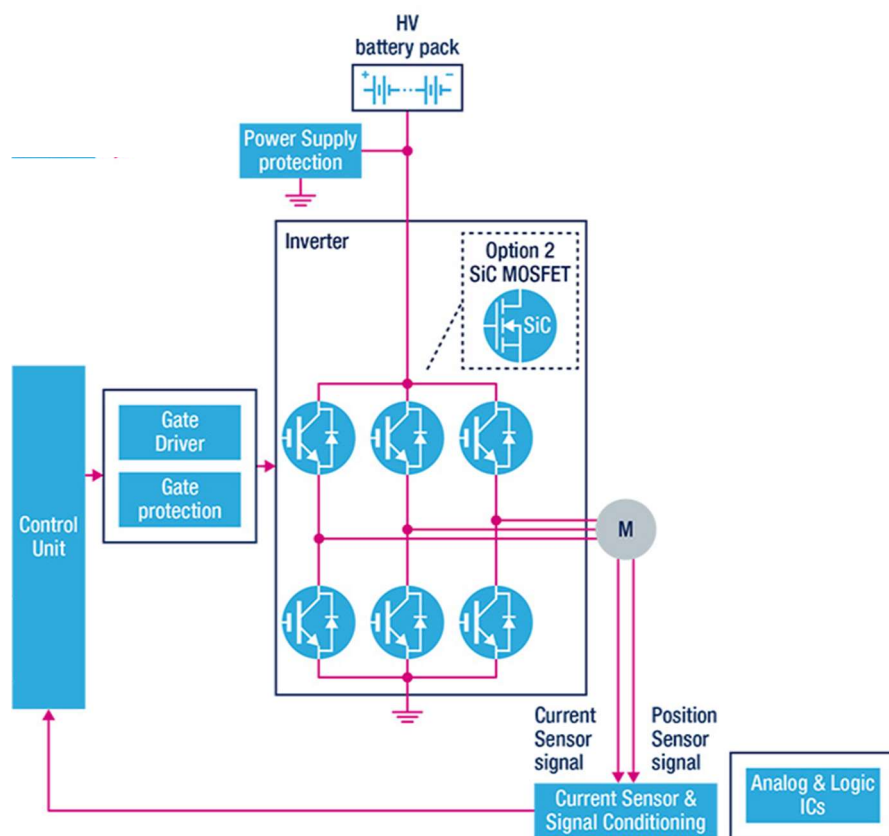
PMSM má vysoký krútiaci moment už pri nižších otáčkach, čo znamená, že môže byť priamo pripojený k vrtuli.



Obr. 1.8: 3D model PMSM E-811 od firmy Pipistrel s ovládačom a konštrukciu na montáž v lietadle [53]

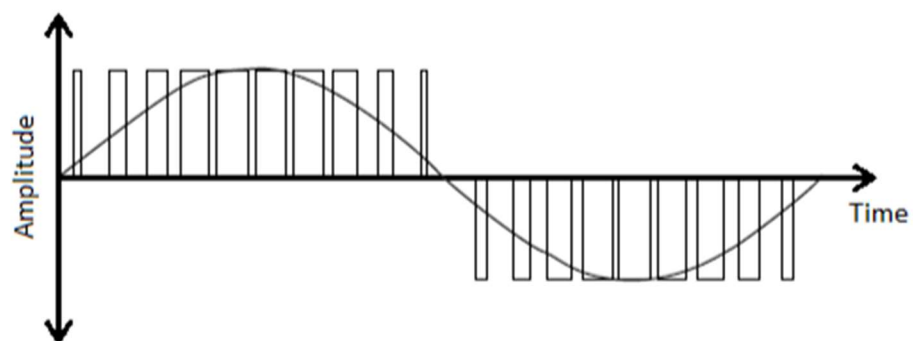
1.4. Invertor

Hlavnou funkciou invertoru je premena jednosmerného prúdu (DC) z batérií na striedavý prúd (AC) potrebný pre motor. DC prúd sa mení na AC opakovaným striedavým zapínaním polovodičových spínačov (IGBT, MOSFET), riadených riadiacou jednotkou. Frekvencia výsledného prúdu je riadená riadiacou jednotkou. Vzniká obdĺžnikový priebeh striedavého prúdu. Na vyhl'adenie priebehu prúdu, aby sa viac podobal sínusovému priebehu sa používa impulzová šírková modulácia (PWM). Príklad zapojenia v obvode je na Obr. 1.9.



Obr. 1.9: Zapojenie invertoru v obvode [55]

PWM rozdelí šírku jedného impulzu na impulzy rôznych dĺžok, čím sa priebeh priemerného prúdu priblíži sínusovému priebehu (Obr. 1.10). PWM sa využíva aj na efektívnu reguláciu výkonu.



Obr. 1.10: Porovnanie sínusoidy s výstupom napätia z PWM [54]

2. Prehľad vybraných elektrických lietadiel

2.1. Pipistrel Velis electro

Ako prvé komerčne predávané lietadlo certifikované EASA (Európska agentúra pre bezpečnosť letectva) bolo vyrobené slovinskou spoločnosťou Pipistrel v júni 2020 a to Velis electro. Pipistrel sa zaoberá výrobou od závesných klzákov po ľahké lietadlá už 30 rokov. Elektrickým lietadlám sa začala venovať v roku 2006 úpravou svojho dvojmiestneho klzáku s motorom na možnosť poháňaného vzletu Electro Taurus, ktorý o rok neskôr mal prvý úspešný let. Firma sa začala zaoberať aj vývojom lietadla s pohonom na palivové články HY4, ktoré malo prvý úspešný verejne prístupný let v septembri 2016. [17] [18] [19]

Velis electro je postavený na základe lietadla Virus sw 121.

Lietadlo je vybavené dvoma batériami o nominálnej kapacite 24,8 kWh zapojenými paralelne, ktoré sú ľahko odnímateľné aby sa na letisku dali rýchlo vymeniť aby nemuselo lietadlo čakať na zemi po celú dobu nabíjania, tieto batérie poskytujú napätie o hodnote 345 V jednosmerného prúdu. Jedna takáto batéria váži 70 kg a je ich možné nabíjať z bežného jednofázového zdroja striedavého napätia 240 V, ale na využitie rýchlonabíjania výrobca odporúča nabíjanie z trojfázového zdroja 380 VAC, pri tomto zdroji výrobca uvádza dĺžku nabíjania z 35% na 95% kapacity batérie zhruba na 80 minút. Batérie sú umiestnené sebestačne, jedna pred kabínou a druhá za (Obr. 2.1), toto rozloženie slúži aj ako bezpečnostný prvok. Pri poruche jednej z nich sa môže automaticky odpojiť od elektrickej siete aby nenastalo ďalšie šírenie poruchy. Po núdzovom odpojení jednej z batérii je stále možné pokračovať v lete, jedna batéria zaručuje dostatok energie aj na následné stúpanie, aby bol umožnený bezpečný dolet na letisko. [17] [18] [19]

Velis je poháňaný certifikovaným elektrickým motorom E-811-268MVLC o výkone 57,6kW chladený vodou, vyvinutý v spolupráci s firmami EMRAX a EMSISO. Ma trojlístú kompozitovú vrtuľu s pevným sklonom listu. Chladiaci systém použitý na chladenie motora pozostáva z dvoch sériovo uložených čerpadiel za batériou, ktorá sa

nachádza za kabínou, nasávanie studeného vzduchu sa nachádza na ľavej strane trupu a vývod ohriateho vzduchu ústi na spodnej strane trupu. [17] [18] [19]



Obr. 2.1: Znáznornenie uloženia pohonnej sústavy v lietadle Velis electro [18]

Maximálna vzletová hmotnosť je 600 kg, čo je maximálna hmotnosť vo svojej kategórii. Prázdna hmotnosť letúnu s inštalovanými batériami je 428 kg a výsledná nosnosť je 172 kg, čo je porovnaní s letúnmi v rovnakej kategórii so spaľovacími motormi výrazne menšia. [17] [18] [19]

Velis electro má hlučnosť 60dB, čo sa dá porovnať s umývačkou riadu. Virus SW 121, model z, ktorého Velis vychádza, má hlučnosť až 70dB. [17] [18]

2.2. Alice

Obrat v vývoji elektrických letúnov vhodných na komerčné lety plánuje firma Eviation s ich letúnom Alice. Eviation je Izraelská startup spoločnosť, založená v roku 2015. Ich cieľom je sprístupniť regionálne lietanie širšej verejnosti a vyvinúť takzvaný „vzdušný taxi“. Túto víziu chcú uskutočniť v podobe letúnu Alice, ktorý by mal mať kapacitu 9 pasažierov a 2 členov posádky a s doletom približne 1 000 km. Maximálny dolet pri nízkom zaťažení uvádzajú na hranicu okolo 1600 km. Je možné že pokým sa uvedie do sériovej prevádzky sa tento dolet podarí ešte zvýšiť vďaka neustálemu vývoju nových

prelomových technológií v oblasti batérií. Aktuálne sa počíta s využitím NMC lítium iónových batérií od firmy Kokam s kapacitou 920 kWh, tieto batérie majú mernú špecifickú energiu zhruba 242 Wh/kg a vážia okolo 3 800 kg, čo je až 60 % z maximálnej vzletovej hmotnosti lietadla ktorá je 6 350 kg a celková nosnosť letúnu je 1134 kg. [20] [22] [24]

Oznámený sú traja dodávatelia motorov a to Magnix s udávaným výkonom 280 kW, Siemens s výkonom 260kW a Rolls-Royce s zatiaľ neudávaným výkonom. Dva motory sú umiestnené na konci krídel (Obr. 2.2) a jeden na konci chvosta, všetky sú orientované smerom dozadu, čím produkujú tlak. Táto orientácia sa použila z dôvodu zníženia odporu a mohla byť použitá vďaka nízkej hmotnosti motoru a to 50 kg. Umiestnením zadného motoru na konci trupu a tvaru trupu, sa docieli upraveniu medznej vrstvy na trupe letúnu, čím sa znižuje odpor. Pri výpadku oboch motorov na krídlach, by mal zaručiť posledný motor bezpečnú vzletovú rýchlosť. Motory majú vodné chladenie, ktoré má na starosti firma Honeywell. Od Honeywellu je tiež ovládací systém, ktorý je plne elektrický (tzv. Fly-by-wire). [20] [22] [24]



Obr. 2.2: Grafické znázornenie uloženia motora a chladenie motora [20]

Letún bolo prvý krát predstavený verejnosti v roku 2019 na Parížskej Air Show. Prvý let bol pôvodne naplánovaný na rok 2020 a prvé doručenia na rok 2022. Tieto termíny avšak nemohli byť dodržané z dôvodu požiaru na batériách 22.januára 2020, po tomto incidente sa prvý let presunul na rok 2021. [21]

Po úspešnom prvom lete bude potrebná certifikácia. Certifikácia potrvá dlhšie ako pri iných elektrických lietadlách postavených na základe už existujúceho lietadla. Trup lietadla je špeciálne navrhnutý s čo najnižším odporom. Výnimočný tvar trupu slúži ako vztlakové teleso, čo znamená, že vztlak je vytváraný nie len krídlami ale aj trupom samotným. Alice má na zníženie odporu použitý chvost tvaru V. [20] [22] [24]

Prvé objednávky si rezervovala letecká spoločnosť Cape Air 92 letúnov po 4 miliónov dolárov za kus. Cena letu je predpokladaná na 200 dolárov na hodinu. [24]

2.3. Lillium Jet

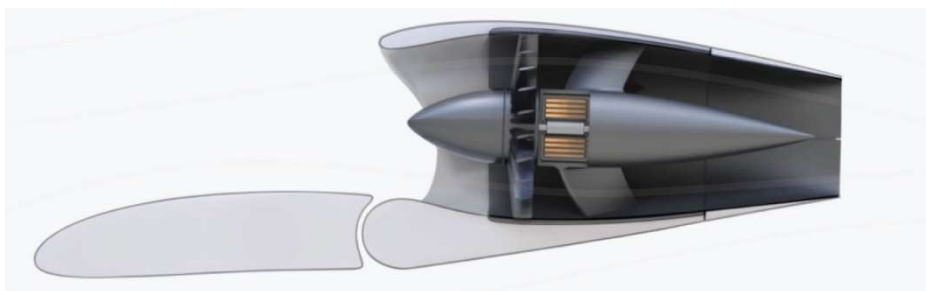
Lilium GmbH je startupová spoločnosť, založená v Nemecku v roku 2015, s víziou predstavenia elektrického lietadla s technológiou VTOL (vertikálny vzlet a pristávanie) a začiatok predaja už v roku 2018. Tento termín sa presunul na rok 2025, hlavne kvôli zdĺhavému procesu certifikácie. Lietadlo malo prvý úspešný verejný let v máji 2019. Lilium má pevné krídlo určené na generovanie vztlaku počas vodorovného letu. Lietadlo využíva VTOL len na prvých a posledných niekoľko minút letu, aby nebolo za potreby pristávať a vzlietať na pristávacej dráhe, vďaka čomu je lietadlo vhodné na regionálny presun medzi menšími mestami bez potreby letiska. [24] [25] [27] [28]



Obr. 2.3: Počítačový model Lilium Jet [24]

Lilium Jet využíva 36 elektrických prúdových motorov (EDF – electric ducted fans) (Obr. 2.3), umiestnených na zadnej časti dvoch pároch krídel. Umiestnenie motorov má priaznivý vplyv na medznú vrstvu. Prechod medzi vertikálnym letom na vodorovný je

umožnený sklápaním motorovej časti krídla. Použité EDF v kryte majú zabudované tlmiče hluku. Pri vzdialenosti 100 metrov, úroveň hluku dosahuje 60dBA, pri výške letu 3000 metrov uvádzajú úroveň hluku 20dBA. Na konci krytov motorov sú umiestnené trysky s meniteľným tvarom, na zvýšenie efektivity počas celého letu. EDF sú zabudované v krídle (Obr. 2.4), čím sa eliminuje potreba krytia samostatných motorov, čo má za následok ušetrenie hmotnosti. [25] [26]



Obr. 2.4: Počítačový model prierezu krídla a EDF [24]

Maximálna rýchlosť dosahuje 280 km/h. Maximálny dolet ešte nie je známy, ako aj kapacita a druh batérií. Plánovaný dolet presahuje hodnoty 250 km, pri použití batérií so špecifickou mernou energiou viac ako 300 Wh/kg a s hustotou energie viac ako 3 kW/kg. Vysoká hustota energie je za potreby, kvôli dvojnásobnému výkonu potrebného na vertikálny vzlet a pristátie oproti výkonu potrebného na vodorovný let.

Predpokladaná hmotnosť batérií je 953 kg. Maximálna vzletová hmotnosť je 3175 kg. Lietadlo má kapacitu 6 pasažierov a pilot. Plánované využitie je ako letecká taxislužba. [24] [25] [27] [28]

2.4. X-57 Maxwell

NASA sa tiež podieľa na vývoji a inovácií technológií podporujúcich rozšírenie elektrických pohonných systémov pre širšie využitie. NASA vyvíja experimentálne lietadlo X-57 Maxwell, je to prvý experimentálny letún s označením X po dvadsiatich rokoch. Označenie „Maxwell“ sa vybralo na počesť škótskeho fyzika Jamesa Clerka Maxwella, ktorý hral výraznú rolu v popísaní elektromagnetizmu. [29] [31]

Lietadlo X-57 je postavené na základe ľahkého lietadla Tecnam P2006T. Tento projekt má slúžiť ako demonštrátor technológie rozloženého elektrického pohonu (DEP – distributed electric propulsion) (Obr. 2.5) po celom rozpätí krídla. Ďalším cieľom NASA je znížiť päť krát spotrebu energie. Využitie elektrického motora 3-násobne znižuje spotrebu energie oproti pôvodnému modelu so spaľovacím motorom. Zníženie odporu lietadla sa snažia doceliť použitím krídla s vysokou štihlosťou, čo má ale za dôsledok malý vztlak pri nízkych rýchlostiach. [29] [31]

Vývoj lietadla je rozdelený na 4 fázy.

Modifikácia 1 – v prvej fáze sa NASA zameriavala na vývoj a testovanie elektrického pohonu, dizajnu a potenciálu rozloženého pohonu. Využitie DEP slúži na zvýšenie rýchlosti vzduchu obtekajúcich krídlo, čím sa umelo zvyšuje vztlak potrebný na vzlet. DEP bolo prvýkrát testované v roku 2015, pomocou krídla pripevneného na ťahači (Obr. 2.5). Na čelnej hrane krídla bolo rozložených 18 elektrických motorov. Tieto testy preukázali až dvojnásobné zvýšenie vztlaku oproti bežnému krídlu. [29] [30]



Obr. 2.5: Testovanie vztlaku vyvolaného DEP [30]

Modifikácia 2 – v súčasnosti sa vývoj nachádza v druhej fáze. NASA sa venuje vývoji a úprave batérií, testovaniu hlavných motorov, vývoj nového krídla s uložením hlavných motorov na koncoch, ďalšie testy na zemi a aj vo vzduchu, pri ktorých sa testy zameriavajú na kontrolu zapojenia elektrických systémov. X-57 bude napájaná z li-ion

batérií, s upravenou architektúrou batériového systému na zvýšenie bezpečnosti a obmedzenie šírenia prípadného požiaru medzi článkami. NASA vyvinula simulátor na zaškoľovanie pilotov a zbieranie spätnej väzby. Testy motorov prebiehajú na špeciálnom držiaku, na určenie výkonových charakteristík. [29] [30] [32]

Modifikácia 3 (Obr. 2.6) - tretia fáza sa začala popri druhej. Hlavným cieľom tretej fázy je výpočet, návrh a príprava krídla s vysokou štíhlosťou, navrhnuté firmou Xperimental. Hlavné motory sú presunuté na konce krídel. Budú použité motory s výkonom 60 kW, od firmy Joby Aviation, s hmotnosťou 25 kg každý. Umiestnenie motorov na koncoch krídel umožňuje využitie energie, ktorá by bola stratená vírením vzduchu na konci krídel. [29] [30]



Obr. 2.6: Znáozornenie tretej modifikácie [30]

Modifikácia 4 – v poslednej fáze sú naplánované letové testy so všetkými 14 motormi (Obr. 2.7). 12 menších motorov bude umiestnených na nábežnej hrane krídla, podobne ako v prvej fáze. Výkon motora je 10,5 kW a hmotnosť je 7 kg. Motory budú používané len pri vzlete a pristávaní, pri dosiahnutí potrebnej rýchlosti na udržanie vztlaku bez potreby motorov, vrtule motorov sa sklopia aby sa znížil odpor. Dva hlavné motory osamote sú schopné vzlietnuť, len by bolo za potreby príliš dlhá vzletová dráha. Pri pristávaní sa malé motory znova zapnú a odstredivou silou sa vrtule znova rozložia. [29] [30]



Obr. 2.7: Návrh konečného dizajnu lietadla [30]

NASA predpokladá hmotnosť lietadla na približne 1360 kg. Použité Li-ion batérie by mali mať hmotnosť 390 kg a 69,1 kWh. Všetky použité motory budú chladené vzduchom. [29] [31]

X-57 nebude určený na komerčné využitie, slúžiť má iba ako demonštrátor. Hlavným cieľom NASA je uľahčiť certifikáciu elektrických lietadiel a upraviť pravidlá regulácie tohto typu pohonu. [29] [31]

2.5. Elektrické letúny v českej republike

2.5.1. Pure flight Φ NIX

V projekte Pure flight je zapojených 4 českých firiem, Sport Prop, Phoenix air. MGM Compro a PEG. Lietadlo Φ NIX je dvojmiestne lietadlo, s plánovanou certifikáciou ELSA (MTOW do 600 kg). Pohonná jednotka zaobstaraná firmou MGM Compro sa skladá z elektromotora o výkone 60 kW umožňujúci cestovnú rýchlosť 160-200 km/h. Doba letu je 2,5 hodiny s batériami typu Li-ion s kapacitou 35 kWh. Batérie majú hmotnosť 150 kg. [33] [34] [35]

Konštrukciu lietadla má na starosti firma Phoenix air. Používajú sa rozkladacie krídla o troch dĺžkach 11 metrov, 15 m alebo až 17 metrov. Využívajú sa krídla pripomínajúce krídla klzákov, aby sa vytváral väčší vztlak. Lopatky vrtule sú s variabilným natočením,

je možné lopatky natočiť tak, aby nevznikal takmer žiaden odpor, a s vypnutým motorom letieť ako na klzáku. [33] [34] [35]

Prvý let bol uskutočnený 6.11.2018 (Obr. 2.8), v roku 2019 vyhralo súťaž Smart-Flyer e-challenge vo Švajčiarsku, kde dosiahlo dolet až 199 km. V súčasnosti sa lietadlo používalo na krátke lety. Lietadlo bolo navrhnuté tak, aby mohlo byť využité ako vlečné lietadlo pre bezmotorové klzáky. [33] [34]



Obr. 2.8: Lietadlo ΦNIX pripravené na let [34]

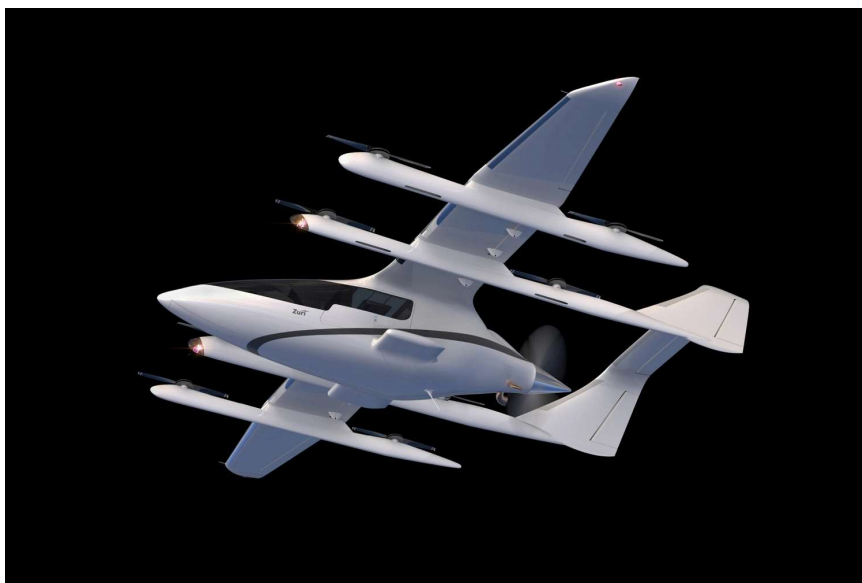
2.5.2. Zuri

Firma Zuri vyvíja hybridné VTOL letún (Obr. 2.9). S vývojom sa začalo v roku 2017, do roku 2020 sa Zuri podarilo vyrobiť 6 modelov na testovanie dizajnu a aerodynamiky letúnu a jeden demonštrátor. Demonštrátor bude jednomiestny letún s rozpätím krídel 11 metrov, na testovanie technológií. Konečný letún má mať 4 miesta pre pasažierov. [36] [37] [38]

Na VTOL fázu letu má byť použitých 8 vertikálnych elektrických motorov, ktoré sú umiestnené na konštrukcii pripevnenej na pevnom krídle, bez bližšej špecifikácie.

Tlačný motor v horizontálnej polohe patrí do hybridnej pohonnej sústavy a má byť umiestnený na konci trupu. Hlavná funkcia tohto motoru je znížiť spotrebu energie oproti VTOL na dlhšie trasy, pri ktorých sa lopatky sa zastavia v pozícii rovnobežnej so smerom letu. Predpokladaný dolet má byť 700 km a s rýchlosťou 250-300 km/h. [36] [37] [38]

Prvý let demonštrátora je naplánovaný na prvú polovicu roku 2021. Zuri plánuje hlavné využitie na lety medzi menšími ostrovmi, bez potreby letísk. [37]



Obr. 2.9: Počítačový model lietadla Zuri [36]

2.5.3. VUT 051 Ray

Na VUT v Brne sa vyvíjalo experimentálne lietadlo v spolupráci so spoločnosťou JIHLAVAN airplanes. Lietadlo slúžilo ako demonštrátor možnosti využitia elektrického pohonu so vtedajšími poznatkami a dostupnými materiálmi. [39] [41] [42]

Hmotnosť letúna je 600 kg z čoho 140 kg tvorí batériová sústava. Použité články sú NCR-18650A, s mernou špecifickou energiou 245 Wh/kg a celkovou energiou batérií 33kWh pri 3060 použitých článkoch. Nominálne napätie plne nabitých batérií je 324 V. Použitý motor typu PMSM má výkon 55 kW. [41] [42]

Lietadlo vychádza z prototypu VUT 001 Marabu, ktorý bol predstavený v roku 2010 Leteckým ústavom FSI. Prvý let VUT 051 RAY prebehol 20.8.2014 (Obr. 2.10). Lietadlo strávilo vo vzduchu 27 minút. [39] [40]



Obr. 2.10: Prvý let lietadla VUT 051 Ray [40]

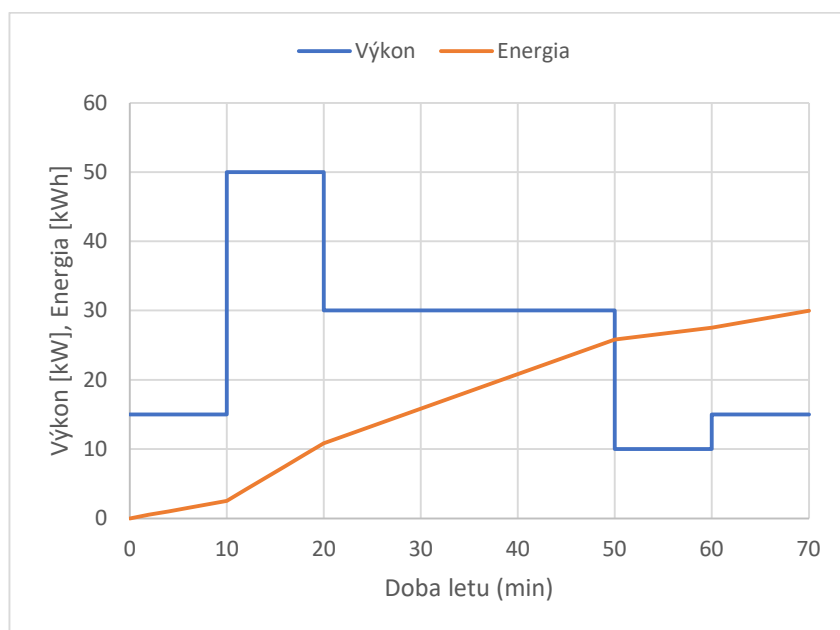
3. Návrh jednoduchéj pohonnej sústavy pre motor s výkonom 50kW

Postup je inšpirovaný postupom návrhu letúnu VUT 051 Ray. [59]

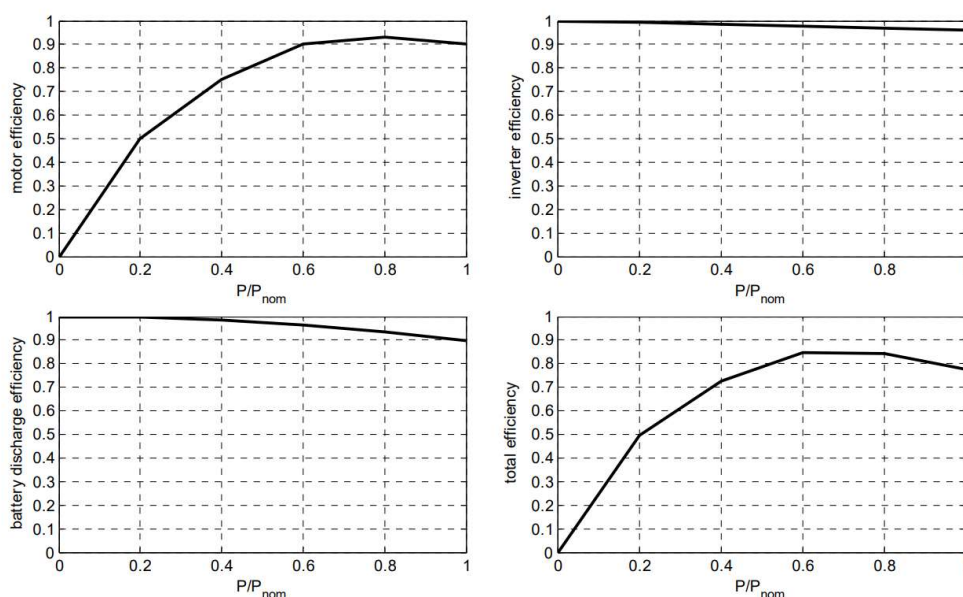
3.1. Určenie charakteristík letu

Priebeh teoretického letu s dĺžkou 70 minút na určenie spotreby energie (Graf 3.1) . Prvých 10 minút pripadá pre pojazd, pri ktorom je výkon motora 15 kW. Následne prichádza vzlet a stúpanie s trvaním 10 minút, pri ktorom ide motor na plný výkon 50 kW, po dosiahnutí požadovanej výšky (záleží od ďalších parametrov lietadla) sa výkon upraví na udržiavanie cestovnej rýchlosti, tento výkon je zvolený na 30 kW. Po 30 minútach letu pri cestovnej rýchlosti sa zníži výkon na 10 kW počas klesania a pristávania. Posledných 10 minút je vyhradených pre pojazd lietadla pri výkone 15 kW.

Graf 3.1: Graf ukazujúci výkon a potrebný výkon počas dĺžky letu



Energiu potrebnú pre tento let určíme integráciou výkonu. Výsledná energia potrebná na tento let je 30 kWh. Batérie musia byť dimenzované na 40,5 kWh, po dosadení do rovnice (1) teoretickej efektivity motoru, invertoru a batérií (Obr.3.1).



Obr.3.1 Grafy na určenie efektivity podľa pomeru výkonu a nominálneho výkonu [59]

Tab 3.1: Parametre častí letu

	Čas [s]	výkon [kW]	celková efektivita [%]	energia motoru [kWh]	energia batérií [kWh]
Pojazd	600	15	0.6	2.500	4.167
Vzlet	600	50	0.78	8.333	10.684
Let	1800	30	0.83	15.000	18.072
Pristávanie	600	10	0.5	1.667	3.333
Pojazd	600	15	0.6	2.500	4.167
Suma	4200	-	-	30.000	40.423

Hodnoty energie, ktorú treba dodať z batérií, sa vypočítajú pomocou tabuľky 3.1.

Energia batérií (W_{bat}) sa vypočíta pomerom mechanickej energie (W_{mech}) a celkovej efektivity obvodu ktorá sa rovná súčinu efektívít prvkov (η_{mot} – efektivita motora, η_{inv} – efektivita invertoru, η_{bat} – efektivita batérie) vid' rovnica (1). Efektivity sa určujú pomocou pomeru aktuálneho výkonu a nominálneho výkonu (50kW), následne sa odčítajú hodnoty z grafu na obrázku 3.2.

$$W_{bat} = \frac{W_{mech}}{\eta_{mot} * \eta_{inv} * \eta_{bat}} \quad (1)$$

3.2. Výber akumulátora

Najdôležitejším parametrom pri výbere batérií na letecké využitie je špecifická energia. Najpriaznivejšie parametre v súčasnosti majú Li-ion články. Jeden z najlepších pomerov medzi špecifickou energiou a životnosťou majú články s NMC chémiou.

Vzhľadom k vlastnostiam, hlavne špecifická energia a dostupnosti, boli vybrané články LG18650MJ1 (tabuľka 3.2)

Tab 3.2: Parametre li-ion článkov uvažovaných na použitie [60]

	LG18650MJ1	ICR18650-32A	LG18650E1	NCR18650GA
Chémia	NMC	LMO	LCO/LMO	NCA
Nominálne napätie[V]	3,65	3,75	3,75	3,6
Maximálne napätie [V]	4,2	4,35	4,35	4,2
Minimálne napätie [V]	2,5	2,75	2,75	2,5
Maximálna kapacita [mAh]	3500	3200	3200	3450
Špecifická energia [Wh/kg]	261	240	245	251
Hmotnosť [g]	49	50	49	49,5

Potrebný počet článkov sa určí z pomeru potrebnej špecifickej energie W_{bat} a špecifickej energie jedného článku W_{cell} (3). Špecifická energia jedného článku sa vypočíta z rovnice (2). Kde U_{nom} je nominálne napätie článku a C_{nom} je kapacita článku.

$$W_{cell} = U_{nom} * C_{nom} = 3.65V * 3.5Ah = 12.775 Wh \quad (2)$$

$$n_{cell} = \frac{W_{bat}}{W_{cell}} = \frac{45000W}{12.775Wh} = 3164.2 \quad (3)$$

Najmenšie množstvo článkov pri danom profile letu musí byť 3165 článkov.

Ďalšie obmedzenie počtu článkov je obmedzenie napätia, aby sa nespálili polovodiče v invertore. Na elektrické vozidlá sa využívajú IGBT moduly s maximálnym napätím 600V. Kvôli rezerve na nabíjanie a vybíjanie sa volí limit výstupu batérií na 400V. Rezerva 20 V sa zvolila z bezpečnostných hľadiska. 90 článkov zapojených do série je schopných dodať a nepresiahnuť 380V. Použije sa 3204 článkov, v konfigurácii 89 článkov uložených sériovo a 36 článkov paralelne.

Články môžu byť uložené do modulov, s ktorými sa ľahšie manipuluje. Tieto moduly sa navrhnu podľa priestoru na uloženie v lietadle.

Kontrola bezpečia z pohľadu prúdu pri maximálnom zaťažení motoru prebieha porovnaním maximálneho doporučeného prúdu určeného výrobcom (10A) a maximálnym potrebným prúdom. Prúd celého akumulátoru (I_{bat}) sa určí z pomeru výkonu elektrického obvodu (P_{bat}) a nominálneho napätia celého akumulátoru (U_{bat}) vid' rovnica (4). Prúd jedného článku (I_{cell}) sa zistí pomerom I_{bat} a počtu článkov zapojených paralelne (n_p) vid' rovnica (5). Hodnoty prúdu sa pohybujú pod hraničnými hodnotami od výrobcu.

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} = \frac{\frac{P_{mech}}{\eta_{cel}}}{U_{nom} * n_{ser}} = \frac{\frac{50000W}{0.78}}{3.6V * 89} = 200.07A \quad (4)$$

$$I_{cell} = \frac{I_{bat}}{n_p} = \frac{200.07A}{36} = 5.56A \quad (5)$$

Hmotnosť použitých článkov je 157 kg. Na články bude pripojený BMS, ktorý bude merať teplotu, napätie a prúd všetkých článkov kvôli bezpečnosti.

3.3. Výber invertoru

Voľba invertoru je rovnaká ako pri letúne VUT 051 Ray vďaka podobnosti zadania. [0]

Záver

Účelom tejto bakalárskej práce je priblížiť čitateľom funkcie, výhody a využitie elektrického pohonu v oblasti leteckej dopravy a predstaviť využitie týchto poznatkov v praxi.

Pohonný systém sa skladá z batérií, motoru a elektroniky ako batériový monitorovací systém, invertor a ovládanie motoru. Práca sa zameriava hlavne na priblíženie rôznych technológií v oblasti batérií a elektromotorov. V súčasnosti sa prejavujú výrazné vedecké pokroky pri vývoji batérií ohľadne zvýšenia stále problémovej špecifickej energie, aby sa mohli porovnať s fosílnymi palivami. Najpoužívanější druh batérií je li-ion vďaka univerzálnemu použitiu a vysokej energii pri nízkej hmotnosti v porovnaní s inými druhmi dostupných batérií. Najčastejšie používané li-ion články sú založené na chémii NMC a NCA, kvôli vysokej špecifickej energii a možnosti modifikácie vlastností podľa potreby. Nevýhodou li-ion batérií je zvýšená náchylnosť na výkyvy teplôt a napätia presahujúce bezpečné hodnoty. Pred niekoľkými rokmi bola jedna z hlavných nevýhod cena, ktorá sa vývojom znížila na úroveň, kde je cenovo dostupná stále širšej verejnosti. Elektrické motory majú výhodu oproti spaľovacím motorom vysokú efektivitu, dosahujúcu viac ako 90%, nie sú závislé na hustote a zloženia vzduchu, čo im umožňuje pracovať aj v extrémnych podmienkach. Elektrický motor s rovnakým výkonom môže mať niekoľkonásobne nižšiu hmotnosť než spaľovací.

Začínajú sa rozširovať firmy ponúkajúce malé letúny aj pre širšiu verejnosť. Zatiaľ čo v tejto oblasti dominujú menšie lietadlá, väčšie lietadlá majú po vývojovej stránke stále veľký kus cesty pred sebou, hlavne kvôli vyhradenej hmotnosti batérií, ktorá môže tvoriť v súčasnosti až 60% celkovej vzletovej hmotnosti. Tím ale letún potrebuje väčší vztlak, čím sa zvyšujú nároky na konštrukciu lietadla.

Podľa zadaného výkonu elektromotora a určeného priebehu letu sa určili výkony a spotreba energie v jednotlivých častiach letu. Podľa zistených hodnôt sa určila celková potrebná energia, ktorú majú dodať akumulátory. Vybrali sa články typu li-ion NMC z dôvodu najvyššej kapacity pri nízkej hmotnosti článku. Podľa celkovej potrebnej energie sa určil minimálny počet použitých článkov. Aby sa predišlo poškodeniu súčiastok invertora, sa podľa maximálneho napätia určil maximálny počet batérií.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] BUCHMANN, Isidor. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery University [online]. CADEX, 11. 2. 2021 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion
- [2] NITTA, Naoki, Feixiang WU, Jung Tae LEE a Gleb YUSHIN. Li-ion battery materials: present and future. Materials Today [online]. 2015, 2015, 2015(18), 252-264 [cit. 2021-3-10]. ISSN 1369-7021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118>
- [3] LÍTIOVÉ AKUMULÁTORY PODĽA CHEMICKÉHO ZLOŽENIA LICOO₂, LIMN₂O₄, LIFEPO₄, NMC, NCA, LI₄Ti₅O₁₂. Teslabike [online]. 4. 9. 2014 [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://teslabike.sk/litiove-akumulatory-podla-chemickeho-zlozenia-licoo2limn2o4lifepo4nmcnca4ti5o12/>
- [4] ČECH, Ondřej, Jiří LIBICH, Marie SEDLAŘÍKOVÁ a Jiří VONDRÁK. Nové trendy ve výzkumu elektrodových hmot pro Lithno-iontové články. Elektrevue [online]. 2012, 30. 8. 2012, 2012(4) [cit. 2021-4-5]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/35/nove-trendy-ve-vyzkumu-elektrodovych-hmot-pro-lithno-iontove-clanky/>
- [5] DUFKOVÁ, Marie. Li-ion baterie. Třípól [online]. 25. 4. 2015n. 1. [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: https://www.3pol.cz/cz/rubriky/prakticke-informace/1677-li-ion-baterie?fbclid=IwAR3cjr7S9hsgQk3w22wCss1FWkw_pZm2il-I92k2FVW97ezHVrzgYJcH5E
- [6] ZHAO, Meng, Bo-Quan LI, Xue-Qiang ZHANG, Jia-Qi HUANG a Qiang ZHANG. A Perspective toward Practical Lithium–Sulfur Batteries. ACS Central Science [online]. 2020, 6(7), 1095-1104 [cit. 2021-4-7]. ISSN 2374-7943. Dostupné z: [doi:10.1021/acscentsci.0c00449](https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00449)

[7] BUCHMANN, Isidor. BU-212: Future Batteries. Battery University [online]. CADEX, 08.9.2020 [cit. 2021-4-7]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries

[8] Příloha školy baterií: Bude budoucnost baterií solidní? Solid-state baterie a jejich premiéra u elektrobusů ve Wiesbadenu [online]. 2021 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <http://proelektrotechniky.cz/elektromobilita/392.php>

[9] BERDICHEVSKY, Gene a Gleb YUSHIN. The Future of Energy Storage: Towards A Perfect Battery with Global Scale. Sila Nanotechnologies Inc. [online]. 2.9.2020 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://silanano.com/wp-content/uploads/2020/09/The-Future-of-Energy-Storage.pdf>

[10] ROBERTS, David. The many varieties of lithium-ion batteries battling for market share: Even a small niche in a trillion-dollar market is a big prize. David Roberts Apr 21 10 5 [online]. 21.4.2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.volts.wtf/p/the-ongoing-battle-among-lithium>

[11] BUCHMANN, Isidor. BU-206:: Lithium-polymer: Substance or Hype? Battery University [online]. 17.11.2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype

[12] Modernjšie Li-Pol batérie sú len v 15% mobilných zariadení. Dôvodom je cena, ktorá je až o päťnásobok vyššia ako u Li-ionových. TouchIT [online]. 12.8.2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://touchit.sk/modernejsie-li-pol-baterie-su-len-v-15-mobilnych-zariadeni-dovodom-je-cena-ktora-je-az-o-patinu-vyssia-ako-u-li-ionovych/248664>

[13] EGAN, D.R., C. PONCE DE LEÓN, R.J.K. WOOD, R.L. JONES, K.R. STOKES a F.C. WALSH. Developments in electrode materials and electrolytes for aluminium–air batteries. Journal of Power Sources [online]. 2013, 236, 293–310 [cit. 2021-5-11]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2013.01.141

[14] LIU, Tao, J. Padmanabhan VIVEK, Evan Wenbo ZHAO, Jiang LEI, Nuria GARCIA-ARAEZ a Clare P. GREY. Current Challenges and Routes Forward for Nonaqueous Lithium–Air Batteries. Chemical Reviews [online]. 2020, 120(14), 6558-6625 [cit. 2021-5-11]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.9b00545

[15] LIU, Yisi, Qian SUN, Wenzhang LI, Keegan R. ADAIR, Jie LI a Xueliang SUN. A comprehensive review on recent progress in aluminum–air batteries [online]. 2017, 2(3), 246-277 [cit. 2021-5-17]. ISSN 24680257. Dostupné z: doi:10.1016/j.gee.2017.06.006

[16] SCROSATI, Bruno, Jürgen GARCHE a Werner TILLMETZ. Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2021-4-15]. ISBN 978-1-78242-398-0. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpABTEV007/viewerType:toc//root_slug:advance-s-in-battery-technologies/url_slug:safety-management?issue_id=kt00UCIWK1

[17] VELIS ELECTRO: ARRIVING FROM THE FUTURE, EASA TYPE-CERTIFIED NOW. Pipistrel-aircraft [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.pipistrelaircraft.sk/velis-electro/>

[18] VELIS ELECTRO: ARRIVING FROM THE FUTURE, EASA TYPE-CERTIFIED NOW. Pipistrel-aircraft [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.pipistrel-aircraft.com/aircraft/electric-flight/velis-electro-easa-tc/>

[19] PROCHÁZKA, Juraj. Pipistrel Velis Electro – certifikované e-lietadlo príliš neoslí. TECHBOX [online]. 16.6.2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://techbox.dennikn.sk/pipistrel-velis-electro-certifikovane-e-lietadlo-prilis-neoslni/>

[20] ALICE Commuter 2024. Eviation [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.eviation.co/aircraft/#Take-a-Look>

[21] HEMMERDINGER, Jon. Eviation Alice fire involved lithium-ion batteries which ignited after hours of powerplant tests. FlightGlobal [online]. 20.11.2020 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/airframers/eviation-alice-fire-involved-lithium-ion-batteries-which-ignited-after-hours-of-powerplant-tests/141228.article?adredir=1&adredir=1&adredir=1&adredir=1>

- [22] PROCHÁZKA, Juraj. Elektrické lietadlo Alice – zmení regionálne lety? TECHBOX [online]. 19.6.2019 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://techbox.dennikn.sk/elektricka-alice-ma-zazracne-zmenit-regionalne-lety/>
- [23] THURBER, Matt. Eviation's Alice To Fly This Year. AINonline [online]. 19.6.2019 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2019-06-19/eviations-alice-fly-year>
- [24] The first electric vertical take-off and landing jet [online]. [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://lilium.com/jet>
- [25] MCINTOSH, Alastair. Technology behind the Lilium Jet: Lilium Blog [online]. In: . [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://lilium.com/newsroom-detail/technology-behind-the-lilium-jet>
- [26] NATHEN, Dr. P. Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept [online]. 7.4.2021, , 1-35 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: https://lilium.com/files/redaktion/refresh_feb2021/investors/Lilium_7-Seater_Paper.pdf
- [27] PROCHÁZKA, Juraj. Lilium získalo ďalší balík peňazí, vývoj lietajúcich taxíkov úspešne pokračuje. TECHBOX [online]. 12.6.2020 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://techbox.dennikn.sk/lilium-ziskalo-dalsi-balik-penazi-vyvoj-lietajucich-taxikov-uspesne-pokracuje/>
- [28] PROCHÁZKA, Juraj. Najnovší prototyp lietajúceho taxíka Lilium sa úspešne vzniesol. TECHBOX [online]. 17.5.2019 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://techbox.dennikn.sk/najnovsi-prototyp-lietajuceho-taxika-lilium-sa-uspesne-vzniesol/>
- [29] How will the X-57 be built? NASA [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/specials/X57/modification.html#2>
- [30] CONNER, Monroe, ed. NASA Armstrong Fact Sheet: NASA X-57 Maxwell [online]. 13.9.2018 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html>

- [31] KILIÁN, Karel. NASA ukázala své experimentální elektrické letadlo Maxwell X-57 [online]. 12.11.2019 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/nasa-ukazala-sve-experimentalni-elektricke-letadlo-maxwell-x-57/sc-870-a-201147/default.aspx>
- [32] MANN, Sarah. X-57 High-Voltage Testing Continues [online]. 10.5.2021 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/x57-high-voltage-testing-continues.html><https://www.nasa.gov/aeroresearch/all-electric-x-57-propeller-designs-undergo-wind-tunnel-tests>
- [33] NĚMEC, Zdeněk. PERSPEKTIVY E-MOBILITY XI BRNO 2019. Odbornecasopisy.cz [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2019/PEM_XI_Amper2019/13-PureFlight_Letectvi.pdf
- [34] Pure plane ΦNIX. Pure Flight [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.pure-flight.eu/Pure-Plane.html#>
- [35] HOLZMAN, Ondřej. Češi sestrojili unikátní elektrické letadlo ΦNIX a chtějí změnit pořádky v leteckém průmyslu [online]. 21. 1. 2019 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.czechcrunch.cz/2019/01/cesi-sestrojili-unikatni-elektricke-letadlo-φnix-a-chteji-zmenit-poradky-v-leteckem-prumyslu/>
- [36] Zuri. Electric VTOL News [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://evtol.news/zuri/>
- [37] SEDLÁČEK, Vojtěch. České Zuri brzy spustí vzdušné testování svého hybridního letounu. Chceme létat 700 kilometrů, plánuje Michal Illich. CzechCrunch [online]. 25. 4. 2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.czechcrunch.cz/2021/04/ceske-zuri-brzy-spusti-vzduzne-testovani-sveho-letounu-chceme-letat-700-kilometru-planuje-michal-illich/>
- [38] TECHNICAL HIGHLIGHTS. Zuri [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://zuri.com/technology/>

- [39] ABÍKOVÁ, Jana. Stroj budoucnosti: letadlo na baterky z VUT. Ekontech.cz [online]. 11. 5. 2015 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ekontech.cz/clanek/stroj-budoucnosti-letadlo-na-baterky-vut>
- [40] Elektrické letadlo z Brna obstálo. Má za sebou první let. Ekontech.cz [online]. 22. 8.2014 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/domaci/elektricke-letadlo-z-brna-obstalo-ma-za-sebou-prvni-let-1111912>
- [41] CERVINKA, Radoslav a Ivo PAZDERA. Electric powered airplane VUT 051 RAY. Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014 [online]. IEEE, 2014, 2014, , 6-10 [cit. 2021-5-3]. ISBN 978-80-214-4816-2. Dostupné z: doi:10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018228
- [42] RŮŽIČKOVÁ, Kateřina. Elektrické pohony – budoucnost v letectví? První let elektricky poháněného letounu VUT 051 RAY [online]. 22. 8. 2014 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.fme.vutbr.cz/fakulta/media/tisk/38139>
- [43] CIPIN, Radoslav, Jan KNOBLOCH, Petr HUTAK, Bohumil KLIMA, Ziad NOUMAN a Jiri VONDRUS. Battery Monitoring System for the Airplane VUT 051 RAY [online]. 2012 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.4729112>
- [44] STAFL SYSTEMS INSIGHTS VIDEO SERIES: Learn the about the latest in lithium-ion battery technology. STAFL SYSTEMS [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.staflsystems.com/insights/>
- [45] BMS (battery management system) [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.velofiala.cz/n/bms-battery-management-system>
- [46] ANDERSON, Aaron D., Nathaniel J. RENNER, Yuyao WANG, et al. System Weight Comparison of Electric Machine Topologies for Electric Aircraft Propulsion [online]. 03.12.2018 [cit. 2021-5-11]. 978-1-62410-572-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8552785>

[47] SUDHA, B, Anusha VADDE a S SACHIN. A review: high power density motors for electric vehicles. Journal of Physics: Conference Series [online]. 2020, 1706 [cit. 2021-5-11]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1706/1/012057

[48] MA, Shaohua, Shuli WANG, Chengning ZHANG a Shuo ZHANG. A method to improve the efficiency of an electric aircraft propulsion system. Energy [online]. 2017, 140, 436-443 [cit. 2021-5-11]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.08.095

[49] BREJL, Milan a Michal PRINC. 3-Phase BLDC Motor with Hall Sensors and Speed Closed Loop, Driven by eTPU on MCF523x: Covers MCF523x and all eTPU-equipped Devices [online]. 06.2005 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2892.pdf>

[50] BLDC Motor Control: Develop BLDC motor control algorithms using simulation. MathWorks [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/bldc-motor-control.html>

[51] KUANG, Zhi, Tianxu ZHAO a Shumei CUI. Five-phase permanent magnet synchronous motor drive for aircraft applications. 2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL) [online]. IEEE, 2016, 2016, , 1-6 [cit. 2021-5-11]. ISBN 978-1-4673-9891-6. Dostupné z: doi:10.1109/CONTROL.2016.7737511

[52] Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/motor-control-permanent-magnet-sync-motor-pmsm-technology?ICID=I-CT-TP-BROWSE-4>

[53] E-811: The first type-certified electric engine for use on General Aviation aircraft [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.pipistrel-aircraft.com/aircraft/electric-flight/e-811/>

[54] PWM Inverter Circuit [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://theorycircuit.com/pwm-inverter-circuit/>

[55] Main Inverter (Electric Traction) [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/applications/electro-mobility/main-inverter-electric-traction.html#overview>

[56] Batérie a akumulátory [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.separujodpad.sk/index.php/obcan/ako-separovat/baterie-a-akumulatory.html?showall=1>

[57] FREDERICKS, William L., Shashank SRIPAD, Geoffrey C. BOWER a Venkatasubramanian VISWANATHAN. Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Electrify Vertical Takeoff and Landing (VTOL) Aircraft. ACS Energy Letters [online]. 2018, 3(12), 2989-2994 [cit. 2021-5-12]. ISSN 2380-8195. Dostupné z: doi:10.1021/acseenergylett.8b02195

[58] BILLS, Alexander, Shashank SRIPAD, William Leif FREDERICKS, Madalsa SINGH a Venkatasubramanian VISWANATHAN. Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Electrify Commercial Aircraft. ACS Energy Letters [online]. 2020, 5(2), 663-668 [cit. 2021-5-12]. ISSN 2380-8195. Dostupné z: doi:10.1021/acsenergylett.9b02574

[59] PAZDERA, Ivo, Bohumil KLIMA, Dalibor CERVINKA, Antonin PISTEK a Jiri HLINKA. Battery System of Electric Airplane VUT 051 RAY. ECS Transactions [online]. 2012, 40(1), 267-273 [cit. 2021-5-12]. ISSN 1938-6737. Dostupné z: doi:10.1149/1.4729113

[60] LG MJ1 18650 Battery, 3500mAh, 10A, 3.65V, Grade A Lithium-ion (LG18650MJ1) [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://voltageplex.com/lg-mj1-18650-battery-lg18650mj1>

[61] ZHANG, Jianan, Lei ZHANG, Fengchun SUN a Zhenpo WANG. An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application. IEEE Access [online]. 2018, 6, 23848-23863 [cit. 2021-5-13]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2824838

[62] Electric aircraft. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Electric_aircraft?fbclid=IwAR07Ko7mrovpgPB2X_MjEW7CbEA4gw7VxXdAJ6NCgvC1CbjTA148XG60qBc

[63] HAMPL, Tomáš. PLNĚ ELEKTRICKÉ KOMERČNÍ LETADLO USKUTEČNILO HISTORICKY PRVNÍ LET [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.airways.cz/zprava/plne-elektricke-komercni-letadlo-uskutecnilo-historicky-prvni-let/?fbclid=IwAR1yDwvmG0-xR4hf9YvietOmyRPaGkyRmdIM8q2Oy89Bw4PYg_J2gKROSIs

[64] Liquid Hydrogen Outline: Why liquefy hydrogen? Why IDEALHY? [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline

[65] PROCHÁZKA, Juraj. Solar Impulse 2 – Bude letecká doprava poháňaná slnkom? [online]. 24.10.2016 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://techbox.dennikn.sk/temy/solar-impulse-2-triumf-technologie-majstrovstva-marketingu/>

Zoznam tabuliek

Tab. 1.1: Porovnanie parametrov určitých druhov elektromotorov [46]	22
Tab 3.1: Parametre častí letu.....	38
Tab 3.2: Parametre li-ion článku LG18650MJ1 [60]	39

Zoznam obrázkov

Obr.1.1: Schéma batérie [61]	13
Obr.1.2: Znázornenie najdôležitejších vlastností LCO [3]	15
Obr.1.3: Znázornenie najdôležitejších vlastností LMO [3].....	15
Obr.1.4: Znázornenie najdôležitejších vlastností MNC [3].....	16
Obr.1.5: Znázornenie najdôležitejších vlastností NCA [3].....	17
Obr.1.6: Schéma BMS [45].....	20
Obr.1.7: Pribeh indukovaného napätia na fázach v závislosti na polohe rotoru [49].....	22
Obr.1.8: 3D model Pmsm E-811 od firmy Pipistrel s ovládačom a konštrukciu na montáž v lietadle [53].....	23
Obr.1.9: Zapojenie invertoru v obvode [55].....	24
Obr.1.10: Porovnanie sínusoidy s výstupom napätia z PWM [54].....	25
Obr.2.1: Znázornenie uloženia pohonnej sústavy v lietadle Velis electro [18]...	27
Obr.2.2: Grafické znázornenie uloženia motora a chladenie motora [20].....	28
Obr.2.3: Počítačový model Lillium Jet [24].....	29
Obr.2.4: Počítačový model prierezu krídla a EDF [24].....	30
Obr.2.5: Testovanie vztlaku vyvolaného DEP [30].....	31
Obr.2.6: Znázornenie tretej modifikácie [30].....	32
Obr.2.7: Návrh konečného dizajnu lietadla [30].....	33
Obr.2.8: Lietadlo ΦNIX pripravené na let [34].....	34
Obr.2.9: Počítačový model lietadla Zuri [36].....	35
Obr.2.10: Prvý let lietadla VUT 051 Ray [40].....	36
Obr.3.1: Graf ukazujúci výkon a potrebný výkon počas dĺžky letu.....	37
Obr.3.2: Grafy na určenie efektivity podľa pomeru výkonu a nominálneho výkonu [59]	38

Zoznam použitých skratiek a symbolov

VAC	.....	Voltov striedavého napätia
LFP	.....	Lítium železo fosfát
LTO	.....	Lítium titán
SRM	.....	Spínací reluktačný motor
IM	.....	Indukčný motor
BDFRM	.....	Brushless doubly fed reluctance machine
IGBT	.....	Bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom
MOSFET	.....	Tranzistor riadený poľom s hradlovou oxidovou vrstvou